

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.6.505>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

5kW급 고체 산화물 연료전지 열관리 계통 LQR 상태 궤환 제어기 설계

정진희* · 한재영* · 성용욱** · 유상석**

* 충남대학교, ** 삼성중공업

Design of LQR Controller for Thermal Management System of 5kW Solid Oxide Fuel Cell

Jin Hee Jeong*, Jae Young Han*, Yong Wook Sung** and Sang Seok Yu**

* Chungnam National Univ.

** Samsung Heavy Industries Co.,Ltd,

(Received January 6, 2015 ; Revised March 22, 2015 ; Accepted March 31, 2015)

Key Words: Solid Oxide Fuel Cell(고체 산화물 연료전지), Thermal Management(열관리), LQR Controller(LQR 제어기), State Space(상태 공간), Gain Scheduling(게인 스케줄링)

초록: 고체 산화물 연료전지는 800~1000℃의 고온에서 작동한다. 고온 작동은 효율에 유리하지만 재료 요구 조건, 신뢰성, 열팽창 문제 등이 발생하여 온도 제어가 중요하다. 본 연구에서는 연료전지 시스템의 열관리를 위한 상태 공간 제어기를 설계하고 응답 특성을 확인하였다. 연료전지 스택과 열관리 핵심 부품인 촉매연소기는 집중 용량법을 이용한 과도 응답 모델을 개발하였고, 구성품과 통합하여 정적 운전 특성을 확인하였다. 개발된 비선형 시스템을 정격 운전 조건에서 다중 입력과 출력이 가능한 상태 공간 식으로 선형화하였다. 부하에 따라 응답특성이 현저하게 달라지는 특성을 제어하기 위해 LQR 제어기를 설계하여 궤환 제어 시스템의 온도를 제어하였다. 상태 궤환 제어기가 적어도 두 개의 제어 계인을 가지고 운전 영역에 따른 응답을 보여줄 때, 원하는 온도 응답을 나타냄을 확인하였다.

Abstract: Solid oxide fuel cell operate at high temperature (800~1000℃). High temperature have an advantage of system efficiency, but a weak durability. In this study, linear state space controller is designed to handle the temperature of solid oxide fuel cell system for proper thermal management. System model is developed under simulink environment with Thermolib®. Since the thermally optimal system integration improves efficiency, very complicated thermal integration approach is selected for system integration. It shows that temperature response of fuel cell stack and catalytic burner are operated at severe non-linearity. To control non-linear temperature response of SOFC system, gain scheduled linear quadratic regulator is designed. Results shows that the temperature response of stack and catalytic burner follows the command over whole ranges of operations.

- 기호설명 -

P_e : 연료전지 출력 (kW)
 V : 연료전지 전압 (V)
 F : 페러데이 상수 (C/mole)
 n : 연료전지 셀 수

\dot{m} : 질량 유량 (kg/s)
 \dot{n} : 몰 유량 (mol/s)
 LHV : 저위 발열량 (kJ/kg)
 P : 압력 (kPa)
 ϵ : 유용도
 N : 전달단위 수
 U : 총합열전달계수 (W/m²K)
 A : 열전달 면적 (m²)

† Corresponding Author, sangseok@cnu.ac.kr

1. 서론

고체 산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell ; SOFC)는 고체 산화물을 전해질로 하는 연료전지로서, 현존하는 연료전지 중 가장 높은 온도에서 작동하며, 국내에서는 기초연구를 시작하여 한국 전력연구원에서 국내 최초로 평판형 연료극 지지체형 SOFC 개발에 성공하였다.⁽¹⁾

주로 발전용과 소형 열병합으로 응용되는 고체 산화물 연료전지는 차량용에 대해 상대적으로 동적 거동 성능 특성에 관한 연구가 희박하다. 하지만, 고온 운전에 따른 구성품 신뢰성이 동적 성능에 민감하다는 것이 알려지면서 동적 거동 특성 및 제어 관련 연구들이 발표되고 있다. E. Achenbach와,^(2,3) Padullés 등,⁽⁴⁾은 전류 밀도의 변화에 따른 전압 및 셀 온도의 거동에 대해서 고찰하였으며, L. Magistri 등⁽⁵⁾은 연료 유량과 셀 전압을 변화시켰을 때, 연료전지의 각종 변수의 시간에 따른 변화 경향을 분석하였다.

고온용 연료전지는 저온형에 비해 상대적으로 열활용도가 매우 중요하다. 전기 화학 반응에 의해 발생한 발열은 스택을 고온으로 유지시킬 뿐 아니라, 일반 발전 설비의 재생 사이클과 유사하게 유입 유체의 승온, 수증기 증발, 외부로 배출하여 열병합으로 활용 등 다양한 용도로 사용이 가능하고 이를 통해 전체 시스템의 효율 향상에 기여하고 있다. SOFC 시스템의 열관리 문제에 대하여 여러 연구가 진행되어왔으며, Inui 등은 셀의 공간적 온도 변화를 최소화하기 위해 최적화된 셀의 공기 흐름과 공기 입구 온도를 조절하여 공기 유용도와 평판형 SOFC의 입구 가스 온도의 작동 변수를 수치적으로 최적화했다.⁽⁶⁾ F. Mueller 등⁽⁷⁾은 단순한 SISO를 기반으로 한 온도 제어 시스템을 개발하였다. C. Hongliang 등⁽⁸⁾은 시스템 안정성과 효율을 최대화하기 위하여 정상상태에서의 열관리 기법에 대하여 연구하였다. 고온 발전용 연료전지 시스템의 효율을 향상시키기 위해서는 열관리 계통의 설계가 시스템 제어보다 중요하기 때문에 아직은 주로 시스템 구성법에 대한 연구가 보고되고 있다. 하지만 SOFC 시스템은 비선형 시스템으로 온도에 영향을 미치는 변수가 여러 개이기 때문에, 단순하고 직관적이며 단일 입출력 시스템에서만 사용가능한 한계가 있는 PID제어는 부적합하다. 따라서 다중 입출력 시스템인 SOFC 시스템을 최적 제어하기에

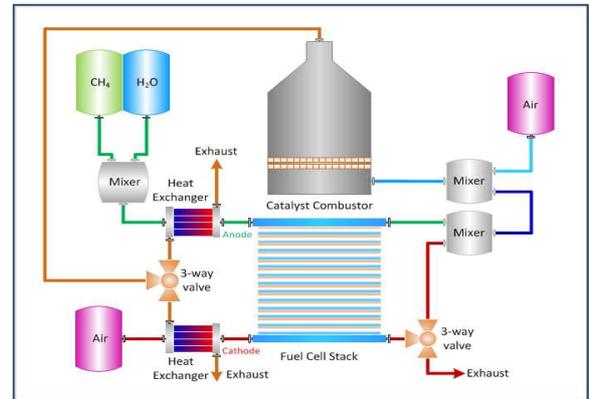


Fig. 1 Schematic diagram of SOFC system

는 LQR 제어가 적합하다.

본 연구에서는 발전용 고온 연료전지 시스템의 열관리를 위한 시스템 제어를 설계하고자 한다. 상태 변수를 포함한 시스템 과도 응답 모델을 개발하고, 정상상태 운전 특성을 확인 한 후, 비선형 연료전지 시스템 모델을 정격 운전 조건에서 선형화한다. 여기서, 선형화에는 다중 입력과 출력이 가능한 상태 공간 식을 적용하고 제어기 설계를 위해 LQR 설계 기술을 적용하여 연료전지 시스템 온도를 제어하고자 한다. 시스템 모델은 MATLAB/SIMULINK[®]의 라이브러리인 EuTech사의 Thermolib[®]기반으로 완성하였다.

2. 연료전지 시스템 모델링

고온 발전용 SOFC 시스템은 Fig. 1과 같이 SOFC 스택, 스택 후단의 잔여 연료를 연소하는 촉매연소기, 그리고 발생한 열을 회수하는 열교환기, 유체를 합쳐주는 가스혼합 챔버, 유체를 나눠주는 3방 밸브로 구성하였다.

2.1 연료전지 스택 모델

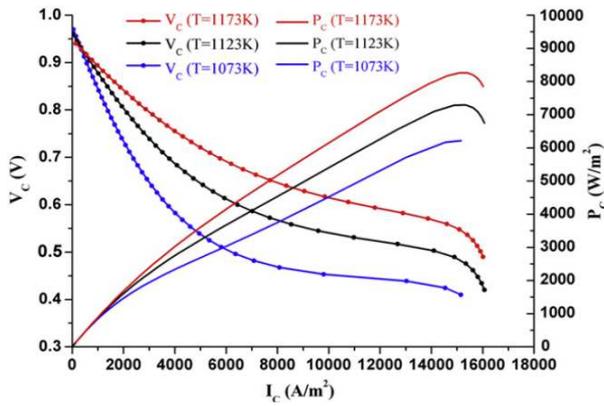
연료전지 스택은 Table 1의 조건으로 운전되도록 구성하였으며, 다양한 운전 온도에 따른 운전이 가능하도록 운전온도에 따른 성능곡선을 Tseronis 등⁽⁹⁾ 데이터를 추출하여 Fig. 2와 같은 성능 맵의 형태로 입력하였다. 스택의 출력을 기준으로 수소 및 공기 사용량은 아래의 계산식을 이용하여 계산하였다.

$$Air_{used} = \frac{P_e}{0.21 \times V \times 4F} [mol/s] \quad (1)$$

$$H_2, used = \frac{P_e}{2V \times F} [mol/s] \quad (2)$$

Table 1 Specification of FC stack at rated power

Parameter	Value
Operating temperature (K)	1000
Electro-active area (m ²)	0.025
Operating current density (A/cm ²)	0.2468
Operating Voltage (V)	0.693
Fuel Utilization (%)	60
Number of cells	117
Operating SOFC power (kW)	5
Initial air temperature (K)	800
Initial fuel temperature (K)	800
Initial stack temperature (K)	1000

**Fig. 2** I-V curve of solid oxide fuel cell in terms of operating temperatures

해석에서는 연료이용률(μ_f)은 60%를 적용하였고, 연료전지 스택은 내부 개질형으로 연료극에 메탄(CH₄)과 물을 SCR(Steam/Carbon ratio) 1:3의 비율로 공급되도록 하였으며 연료량은 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$Fuel_{in} = \frac{I \times n}{2F \times \mu_f \times 0.99982} \quad (3)$$

시스템 전기효율은 시스템으로 투입되는 전체 연료량과 시스템으로부터 나오는 전력 출력량 관계를 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta_{elec} = \frac{P_e}{(n_{fuel} \times LHV_{fuel})_{in}} \times 100 [\%] \quad (4)$$

2.2 3방 밸브 모델 및 가스혼합 챔버 모델

3방 밸브는 촉매연소기의 온도 조절을 위한 제어 밸브로 1기를 사용하고, 연료극과 공기극 입

구 유체의 예열을 위해 1기를 사용하였다. 3방 밸브는 개도에 따라 입구 유량을 분리하기 때문에 다음과 같이 구하였다. 식 (5)의 f 는 밸브 개도를 나타낸다.

$$\dot{m}_{out1} = f \times \dot{m}_{in} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{out2} = (1-f) \times \dot{m}_{in} \quad (6)$$

가스혼합 챔버는 유입되는 두 유체를 합쳐 하나의 유체로 배출하는 역할을 하며 출구단 공기극의 3방 밸브에서 분리된 공기와 잔여 연료를 혼합하는 곳에 1기를 설치하고, 혼합된 유체와 새로운 상온 공기를 혼합하여 촉매연소기로 공급하는 곳에 1기를 적용하였다.

$$\dot{m}_{in1}h_{in1} + \dot{m}_{in2}h_{in2} = \dot{m}_{out}h_{out} \quad (7)$$

$$p_{out} = \frac{\dot{m}_{in1}p_{in1} + \dot{m}_{in2}p_{in2}}{\dot{m}_{in1} + \dot{m}_{in2}} - \Delta p_{loss} \quad (8)$$

$$\Delta p_{loss} = k \times \dot{m}^2 \quad (k : \text{pressure loss factor}) \quad (9)$$

2.3 촉매연소기 모델

촉매연소기는 연료전지 스택에서 배출되는 잔여 연료를 연소시켜 발생된 열을 재활용하는 장치로 연료전지 스택에 공급되는 연료와 공기의 온도를 높이기 위해 사용하였다. 촉매연소기 모델은 각각 잔여 연료 물질에 대하여 완전 연소될 수 있도록 개별 반응기를 선택하고 주어진 반응을 제외한 각 혼합가스 사이에 반응은 없다고 가정한 평형 반응기를 조합하여 구성하였다.

2.4 열교환기 모델

열교환기는 폐열을 활용하여 연료전지 스택에 유입되는 공기와 연료의 온도를 높이는데 이용하였다. 열교환기 모델은 ϵ -NTU법의 대향류 형 유동배열을 적용하였다.

Fig. 3은 Simulink의 Thermolib[®] 라이브러리를 이용하여 구성된 시스템 모델을 보여주고 있다. 구성된 시스템 모델은 구성품 정보에 따른 시스템 통합이 완료된 상태로 외부 입력에 대한 오픈 루프 결과를 확인할 수 있다. 구성된 모델을 이용해 부하를 60A에서 30A까지 변화시키게 되면 Fig. 4와 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉, 부하 감소에 따라 시스템 내부에서 사용할 폐열이 부족하여 전체 온도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 부하가 감소하면 연료전지 스택의 온도가 떨

Table 2 Rated operating point of SOFC system

Parameter	Value
T_{FC} (K)	1073
T_{CC} (K)	1123
I (A)	61.7
P	0.5015
\dot{n}_{Air} (mol/s)	0.5835

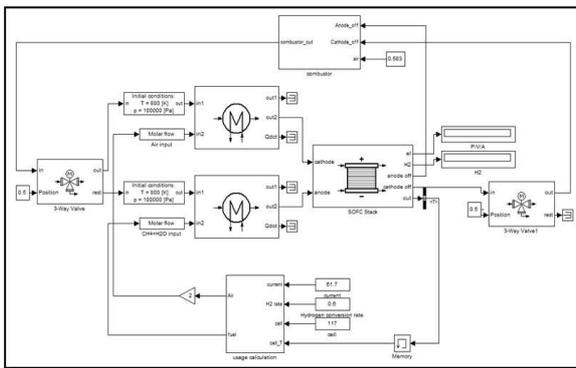


Fig. 3 SOFC system model under Thermolib[®] platform

어지고, 그 폐열을 이용하는 촉매연소기의 온도가 낮아지면 연료전지 스택에 공급되는 연료와 공기의 온도를 높이고자하는 열교환기의 온도 또한 떨어지기 때문이다.

3. 상태 공간 제어기 설계

3.1 상태 공간 시스템 모델

상태 공간 식은 여러 가지의 상태 변수와 입력 신호를 갖는 시스템을 제어하는데 효과적으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 상태 변수로 연료전지 스택 온도(T_{FC}), 촉매연소기 온도(T_{CC})를 선정하고, 제어 입력 변수로 스택 온도 제어를 위해 촉매연소기의 배출가스를 나눠주는 3방 밸브의 개도(P), 촉매 연소기 온도 제어를 위해 촉매연소기로 유입되는 상온 공기량(\dot{n}_{Air})을 선정하였다. 여기에 연료전지 스택에 요구되는 전류를 외란으로 설정하여, 전류 변화에 따라 제어가 가능하도록 설계하였다. 시스템 모델은 비선형이기 때문에 Table 2의 정격 운전 조건에서 선형화를 수행하면 다음과 같은 상태 공간 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dT_{FC}}{dt} = \frac{1}{m_{FC}C_{p,FC}}(\dot{Q}_{stack} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{CL}) \quad (10)$$

Table 3 Geometric information of stack and catalytic combustor

Parameter	Value	Material
Interconnector (mm)	1.5mm	Inconel 600
Cathode (mm)	1mm	YTZP
Electrolyte (mm)	0.1mm	
Anode (mm)	0.1mm	
Active Area (mm ²)	150×150	
Stack Volume(m ³)	0.2454144	
Combustor Volume (mm ³)	120×300×50	Ceramic
Catalyst volume(m ³)	0.378416	

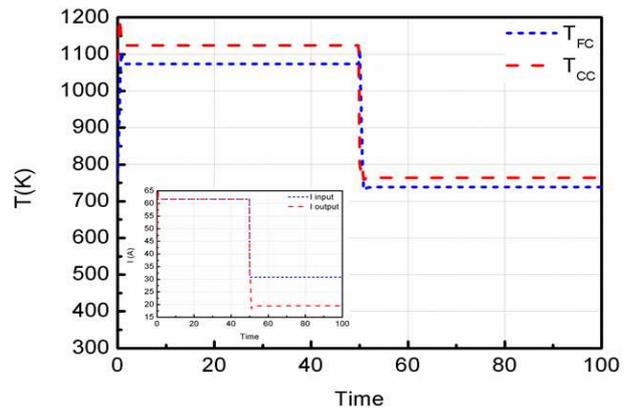


Fig. 4 Temperature response of SOFC stack and catalyst combustion with open loop control

$$\frac{dT_{CC}}{dt} = \frac{1}{m_{CC}C_{p,CC}}(\dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{conv}) \quad (11)$$

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_w w \quad (12)$$

$$y = Cx + Du \quad (13)$$

\dot{Q}_{stack} 은 연료전지 스택에서 전기화학반응에서 발생된 열이다. \dot{Q}_{CL} 는 연료전지 스택에 공급되는 반응용 공기에 의해 냉각되는 열이며, \dot{Q}_{conv} 는 주위(대기)로 전달된 열이다.

식 (11)의 \dot{Q}_{in} 과 \dot{Q}_{out} 을 구하기 위해 가스의 엔탈피 \bar{h} 를 600~1600K 범위에서 피팅 함수식을 적용하여 구하였다. 상태 공간 식 (12)와 (13)의 A, B_u , B_w , C, D를 결정하기 위해 정격 운전 조건과 기하학적 형상 정보를 이용하였다. 촉매연소기는 촉매층을 고려하여 공급률 60%의 조건을 사용하였으며, 문헌상의 기하학적 조건인 Table 3

의 조건을 이용하여⁽¹⁰⁾ 최종적으로 연료전지 스택 질량($m_{FC}=52.749kg$), 촉매연소기 질량($m_{cc}=7.3872kg$)의 결과를 얻었다. 결정된 상태 공간 식의 A, Bu, Bw, C, D는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -6.1677 \times 10^{-4} & 3.0831 \times 10^{-4} \\ 0.0012 & -0.0049 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B_u = \begin{bmatrix} -1.3391 & 0 \\ 0 & -3.8379 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0.0040 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$D = 0 \quad (18)$$

3.2 LQR 제어기 및 게인 스케줄링

상태 공간 제어기를 설계하기 위하여 LQR (Linear Quadratic Regulator)를 적용하였다. 제어기 설계 시 외란에 따른 제어 응답의 정확도를 높이기 위해 적분요소를 포함하여 LQR을 설계하였다.

$$u = -K[x \ x_I] \quad (19)$$

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q_x x + x_I^T Q_I x_I + u^T R u) dt \quad (20)$$

LQR 게인은 K 행렬로 나타내며, 상태가중행렬 Q와 제어가중행렬 R은 대각행렬에 가중치를 두는 방법을 이용하였다. 적분기를 포함하여 강화된 시스템의 정격 조건에 따른 A' , B' , Q' , R' 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A' = \begin{bmatrix} -6.1677 \times 10^{-4} & 3.0831 \times 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0.0012 & -0.0049 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{load: 100\%} \quad (21)$$

$$B' = \begin{bmatrix} -1.3391 & 0 \\ 0 & -3.8379 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{load: 100\%} \quad (22)$$

$$R' = \rho \begin{bmatrix} 3.9745 & 0 \\ 0 & 2.937 \end{bmatrix}_{load: 100\%} \quad (24)$$

$$A' = \begin{bmatrix} -3.952 \times 10^{-4} & 1.7796 \times 10^{-4} & 0 & 0 \\ 6.1855 \times 10^{-4} & -0.0028 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{load: 50\%} \quad (25)$$

$$B' = \begin{bmatrix} 43.6997 & 0 \\ 0 & -3.8379 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{load: 50\%} \quad (26)$$

$$R' = \rho \begin{bmatrix} 6.7958 & 0 \\ 0 & 11.7484 \end{bmatrix}_{load: 50\%} \quad (27)$$

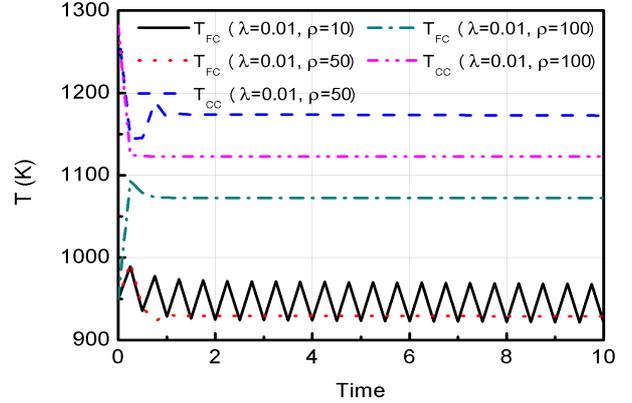


Fig. 5 SOFC Stack and combustor temperature in terms of weight factor of LQR

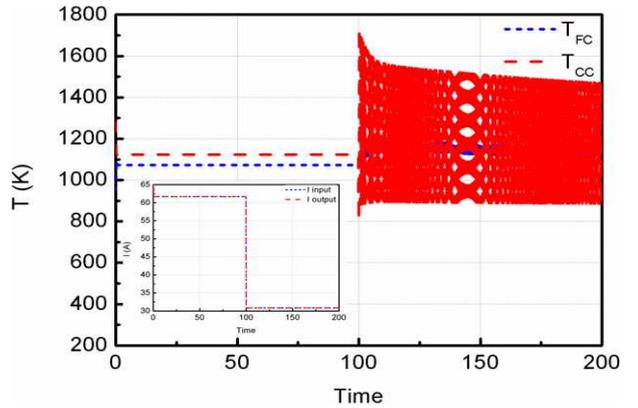


Fig. 6 Instability of temperature response of state variables operating point controller under load change

$$Q' = \lambda \times 10^{-7} \begin{bmatrix} 8.6856 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.9294 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8.6856 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.9294 \end{bmatrix} \quad (23)$$

load: 50%
load: 100%

LQR 게인 K를 구하기 위해 Fig. 5와 같이 Q와 R의 가중치 변화에 따른 온도 응답을 확인하여 가중치 λ , ρ 을 선정하였다. 고온형 SOFC 시스템에서는 운전 부하 변화에 따른 비선형성이 커지기 때문에, 정격 조건을 기준으로 설계된 제어기가 부분 부하에서 제어 지령을 적절히 추정하지 않았다. Fig. 6은 정격조건을 기준으로 설계된 제어기가 50%부하에서 지령에 따른 응답에 수렴하지 않고 온도가 요동치는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가변 부하에서 연료전지 시스템의 온도를 적절히 제어하기 위하여 전류 부하가 50%, 100%일 때에 대하여 시스템에 관한 두 개의 선형 모델을 유도하고, 각각의 부하 조건에

서 LQR을 이용해 적절한 게인을 결정하였다. 시스템 온도 응답 특성의 변화에 대해 게인을 적용시켜 본 결과 약 80% 부하 이상의 조건에서부터는 정격 부하 게인을 적용해도 운전이 정상적으로 진행되는 것을 확인하였다.

이를 바탕으로 두 개의 게인이 각각의 운전 영역에 맞춰 가변 부하 입력에 따른 조건별 제어가 가능하도록 게인 스케줄링을 하였다. 요구되는 부하 조건이 어느 운전 영역인가에 따라 2단계 부하 게인(k_I , k_{II})으로 설정되어 시스템의 온도를 제어하게 된다.

$$load \leq 80\% : k_I$$

$$load > 80\% : k_{II}$$

상태가중행렬 Q와 제어가중행렬 R의 가중치는 50% 열부하에서 $\lambda=0.01$, $\rho=500$, 100% 열부하는 $\lambda=0.01$, $\rho=100$ 이 적절하다고 판단하여, 이를 궤환 제어 시스템에 적용하여 온도를 제어하였다

4. 시스템 응답 특성

고온 발전용 연료전지 시스템은 열활용도를 극대화 하여, 발전 효율을 올려야 하는 설비이다. 그러므로 각 기기의 열 흐름이 모두 서로 복잡하게 연결되어 운전 시 응답의 비선형성이 매우 크고 복잡해지기 때문에 부하 조건에 따른 선형화가 어렵고 따라서 정격조건에 의한 제어기 설계는 한계가 있다. Fig. 6에서는 정격 운전 조건에서 설계된 제어기를 적용하여 제어를 수행하고 응답을 확인한 결과, 정격으로부터 과도하게 벗어나는 50% 부하 조건에서는 온도 응답이 불안정하였다.

그러므로 선형 제어기의 운전 점을 두 개로 나누어 부하 80%를 전후로 각각 운전 영역 범위 안에서 응답 지령을 적절히 수행할 수 있도록 로직을 구성하여 그 결과를 확인하였다. Fig. 7에는 제어기 설계에 있어서 정격 점과 50% 부하 점에서 설계된 상태 궤환 시스템을 이용해 두 개의 LQR게인을 얻고 시스템을 제어한 결과이다. 운전 부하가 50%로 감소한 환경에서도 원하는 온도 지령에 맞추어 시스템 응답이 변화하는 것을 확인할 수 있다.

시스템 응답이 제어 로직에 따라 원활하게 수행 되는 지 확인하기 위해 부하를 50%부터 순차적으로 증가시키면서 상태 변수(연료전지 스택

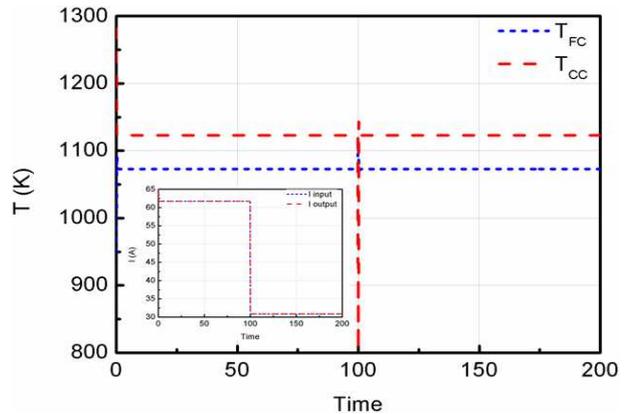


Fig. 7 Temperature response of SOFC stack and catalyst combustion at gain scheduling

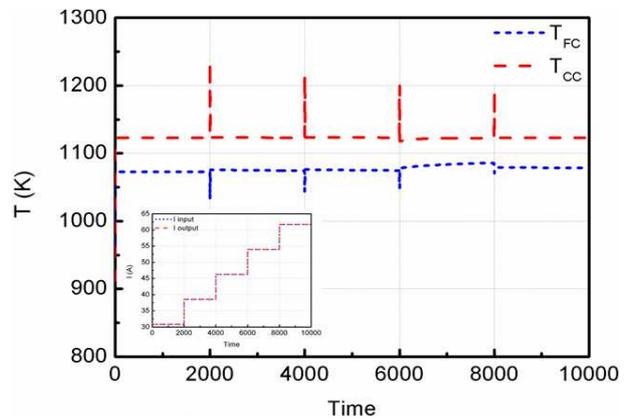


Fig. 8 Temperature response of SOFC stack and catalyst combustion on current variation

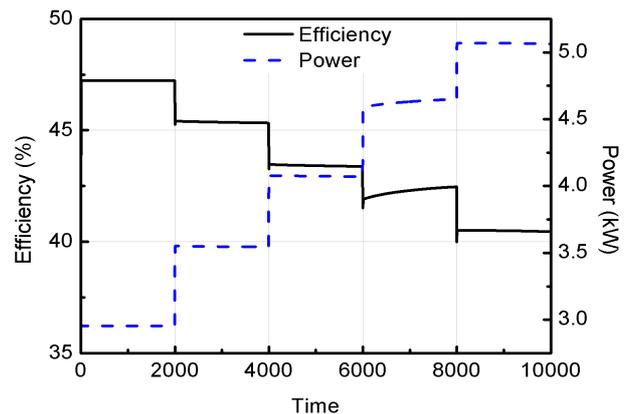


Fig. 9 Efficiency and power response of SOFC system on current variation

온도, 촉매연소기 온도)의 지령에 따른 응답을 확인하였다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 온도 응답은 부하가 변하는 동안에도 연속적으로 지령 온도에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 온도 응답에 따른 출력은 Fig. 9에 나와 있다. 스택 전압이 온도에 따라 영향을 받기 때문에 그림에서는 출력과 효율

이 스택 온도 제어 지령에 따라 같이 반응을 하는 것을 볼 수 있다. 또 부하 증가 시 효율이 감소하며, 출력은 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 연료전지 시스템의 열관리를 위하여 연료전지 스택과 촉매연소기의 온도를 제어하고자 한다. 이를 위해 연료전지 스택, 촉매연소기, 열교환기, 믹서, 3방 밸브로 구성된 연료전지 시스템 모델을 설계하고, LQR 제어기를 통해 궤환 제어 시스템의 온도를 제어하고자 하였다.

(1) 5kW를 정격 운전 조건으로 정하고, 상태 변수는 연료전지 스택 온도와 촉매연소기 온도, 입력 변수는 열교환기 전단의 3방 밸브 개도와 촉매연소기로의 추가 공기, 외란은 전류를 선정하여, 정격 운전 조건에서 선형화하여 상태 공간 식을 설계하였다.

(2) 상태 공간 식을 이용하여 외란의 오차를 줄일 수 있는 적분요소를 포함하여 LQR을 설계하였다. 연료전지 시스템은 비선형 시스템이므로 추가로 50% 열부하 조건에서 상태 공간 식과 LQR을 설계하고 게인 스케줄링을 하여 온도 응답을 확인하였다. 상태가중행렬 Q와 제어가중행렬 R의 가중치를 50% 열부하에서 $\lambda=0.01$, $\rho=500$, 100% 열부하는 $\lambda=0.01$, $\rho=100$ 이 적절하다고 판단하여 궤환 제어 시스템에 적용하였다.

(3) 두 개의 운전 조건에서 제어기를 설계하여 궤환 제어 시스템에 적용하여 전류 변화에 따른 연료전지 스택과 촉매연소기 온도 응답을 확인한 결과, 시간 흐름에 따라 제어 온도로 수렴해 가는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2014년도 한국연구재단의 지역 혁신 인력 양성 사업(No.201206A0106312010100)과 2014년도 한국연구재단의 일반연구자 지원 사업(기본연구)(No.2014053692)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고문헌 (References)

(1) Yu, S. Y., 2006, "System Development Status of Local SOFC Stack and Overseas Technology

Trends," *Journal of Energy Management*, pp. 63~73.

(2) Achenbach, E., 1994, "Three-Dimensional and Time-Dependent Simulation of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Stack," *J. Power Sources*, Vol. 49, pp. 338~348.

(3) Achenbach, E., 1995, "Response of a Solid Oxide Fuel Cell to Load Change," *J. Power Sources*, Vol. 57, pp. 105~109.

(4) Padullés, J., Ault, G. W., McDonald, J. R., 2000, "An Integrated SOFC Plant Dynamic Model for Power Systems Simulation," *J. Power Sources*, Vol. 86, pp. 495~500.

(5) Magistri, L., Trasino, F. and Costamagna, P., 2004, "Transient Analysis of Solid Oxide Fuel Cell Hybrids. Part A : Fuel Cell Models," *ASME*, Paper GT2004-53842.

(6) Inui, Y., Ito, N., Nakajima, T. and Urata, A., 2006, "Analytical Investigation on Cell Temperature Control Method of Planar Solid Oxide Fuel Cell," *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, No. 15-16, pp. 2319~2328.

(7) Mueller, F., Fardadi, M., Shaffer, B., Brouwer, J. and Jabbari, F., 2010, "Transient Performance of Integrated SOFC System Including Spatial Temperature Control," *ASME*, Paper No. FuelCell2010-33304, pp. 237~247.

(8) Hongliang, C., Xi, L., Zhonghua, D., Jian, L. and Yi, Q., 2013, "Thermal Management Oriented Steady State Analysis and Optimization of a kW Scale Solid Oxide Fuel Cell Stand-alone System for Maximum System Efficiency," *J. Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 28, pp. 12404~12417.

(9) Tseronis, K., Bonis, I., Kookos, I. K. and Theodoropoulos, C., 2012, "Parametric and Transient Analysis of Non-isothermal, Planar Solid Oxide Fuel Cells," *International journal of hydrogen energy*, Vol. 37, No. 1, pp. 530~547.

(10) Lee, S. M., Woo, H. T. and Ahn, K. Y., 2011, "Effect of Flow Uniformity Device on the Catalytic Combustor for 5 kW High Temperature Fuel Cell System," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 6, pp. 878~883.

(11) Larminie, J. and Dicks, A., 2003, *Fuel Cell Systems Explained 2nd Edition*, John Wiley&Son, Inc.